

Ročník 9, Číslo I., duben 2014

INTEGRÁCIA MEDZI INERCIÁLNYM NAVIGAČNÝM SYSTÉMOM A GLOBÁLNYM NAVIGAČNÝM SATELITNÝM SYSTÉMOM

INERTIAL NAVIGATION SYSTEM AND GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM INTEGRATED

Jozef Krešák¹, Andrea Bérešová²

Anotácia: Príspevok je zameraný na definíciu Globálneho navigačného satelitného systému ako aj Inerciálneho navigačného systému. INS je vysvetlený na základe referenčných rámcov, doplnený ilustráciami pre lepšie pochopenie. GNSS vysvetľuje komunikáciu medzi jednotlivými troma segmentmi, ktorými sú riadiaci, užívateľský a kozmický. Integrácia medzi systémami môže byť prevádzaná pomocou troch integračných metód. V závere článku je zhodnotený prínos navigačných systémov v technických a priemyselných odvetviach.

Kľúčové slová: GNSS – globálny navigačný satelitný systém, GPS – globálny polohový systém, INS – inerciálny navigačný systém, IMU – inerciálna meracia jednotka

Summary: The paper is aimed on the definition of global navigation satellite system and inertial navigation system. INS is explained on the basis of the reference frame, complete with illustrations for better understanding. GNSS explains the communication among the three segments, namely management, user and space. Integration between systems may have been transferred by three integration methods. In conclusion, the article is assessed contribution navigation systems in technical and industrial sectors.

Key words: GNSS – global navigation satellite system, GPS – global position system, INS – inertial navigation system, IMU – inertial measurement unit

ÚVOD

Integrácia medzi INS a GNSS je veľmi aktuálnou témou súčasnosti. Článok definuje INS a jeho jednotlivé referenčné rámce, taktiež GNSS, ktorý pracuje v rámci troch segmentov – kozmický, riadiaci a užívateľský. V neposlednom rade približuje integráciu medzi systémami a integračné metódy – voľnú, pevnú a ostatné. Záver hodnotí prínos navigačných systémov v rôznych priemyselných a technických oblastiach.

¹ doc. Ing. Jozef Krešák, PhD, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií, Ústav logistiky, priemyslu a dopravy, Park Komenského 14, 043 84 Košice, Tel.: +421 55 602 2815, E-mail: jozef.kresak@tuke.sk

² Ing. Andrea Bérešová, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií, Ústav logistiky, priemyslu a dopravy, Park Komenského 14, 043 84 Košice, Tel.: +421 55 602 2932, E-mail: andrea.beresova@tuke.sk

1. INS

1.1 Vlastnosti inerciálních navigačních systémů (INS)

Inerciální navigace je metoda relativní lokalizace pracující na základě naměřeného zrychlení, z kterého je možné pomocí integrace vypočítat okamžitou rychlost a z nej je možné také určit aktuální polohu. Pro udržení pevné orientace osy, v které se zrychlení měří, při rotaci celého zařízení se využívá gyroskop. Výhodou metody je její nezávislost na externí referenci a okolním prostředí, u většiny řešení aj odolnost proti rušení a vonkajšími vplyvy. Tato metoda má i stejné principiální nevýhody, je omezená přesností použitých senzorů a musí se také vypořádat s několika problémy vyplývajícími z podstaty jejího fungování. Zemská tíže způsobuje, že akcelerometre v zvislém směru neměřují jen vertikální zrychlení, ale součet skutečného vertikálního zrychlení a gravitace. Gravitační složku je proto nutné z hodnoty akcelerometru opět odčítat. Dalším problémem je zemská rotace, protože Zem se otáčí rychlostí 15° za hodinu okolo vlastní osy a $0,041^\circ$ za hodinu okolo Slunce. Gyroskopy zajišťují stálou orientaci nebo měří změnu orientace v prostoru, ne však vůči zemědě, proto je nutné s rotací Země počítat při zpracování hodnot. Náhradním řešením je gyrokompas, který je konstruován tak, aby byl gravitační silou udržován v rovině rovnoběžné s hladinou moře.

Inerciální navigace se v nejvyšší míře využívá v letecké dopravě, ale v posledním období se v značné míře využívá v dopravě v podzemí jako krátkodobá náhrada GPS při výpadku jejího signálu (1).

Existují dvě řešení inerciálních navigačních systémů, při kterých je potřebná přítomnost troch akcelerometrů a troch gyroskopů. Ide o INS s pevnou orientací akcelerometrů v prostoru a o INS s akcelerometry pevně spojenými s zařízením (1).

1.2 Referenční rámce

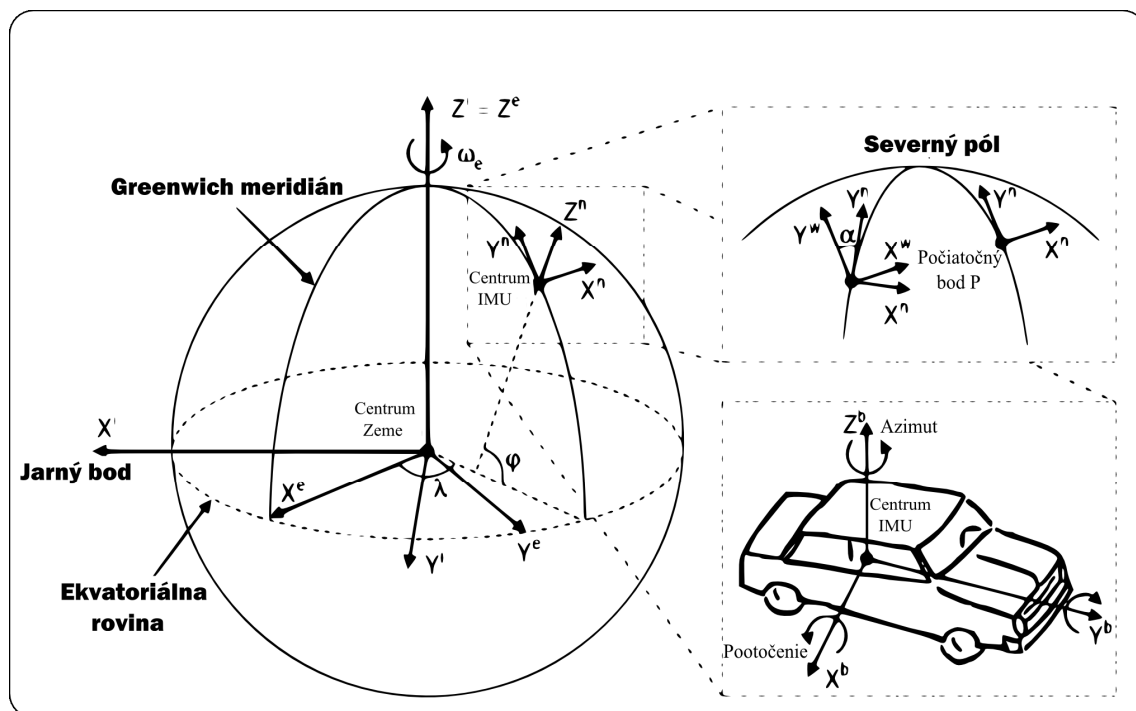
1.2.1 Inerciální referenční rámec (*Inertial frame, i-frame*)

Inerciální referenční rámec má těžiště v středu Země a osy, které jsou nerotující vzhledem na pevné hvězdy. Osi referenčního rámce obsahují následující parametry:

Z^i - os je rovnoběžná s osou rotace Země,

X^i - os směřující k jarnímu bodu,

Y^i - os kolmá na osy X^i a Z^i , tvoří systém na pravotočivý a pravouhlý



Zdroj: <http://www.imm.dtu.dk/> (upravili autori)

Obr. 1: Rozdiely medzi jednotlivými referenčnými rámcami

1.2.2 Zemský centralizovaný pevný referenčný rámec (Earth-centered-earth-fixed frame, e-frame)

Zemský centralizovaný pevný referenčný rámec má ťažisko v strede Zeme a jeho osi sa otáčajú spolu so Zemou. Osi referenčného rámca obsahujú nasledujúce parametre:

- Z^e - os je rovnobežná s osou rotácie Zeme,
- X^e - os smerujúca k Greenwich-skému meridiánu,
- Y^e - os kolmá na osi X^e a Z^e , dotvára systém na pravotočivý a pravouhlý.

1.2.3 Bodový referenčný rámec (Body frame, b-frame)

Kostra bodového referenčného rámca má ťažisko v strede inerciálnej meracej jednotky (IMU – Inertial Measurement Unit) a osi sú zosúladené s rámom vozidla.

- Z^b - os smerujúca k pravej strane vozidla,
- X^b - os smerujúca k prednej strane vozidla,
- Y^b - os kolmá na osi X^b a Z^b , dotvára systém na pravotočivý a pravouhlý.

1.2.4 Navigačný rámec (Navigation frame, n-frame)

Navigačný rámec má ťažisko v strede inerciálnej meracej jednotky (IMU – Inertial Measurement Unit) a os rotácie je totožná s osou rotácie Zeme.

- Z^n – os smerujúca k elipsoidickému východu (geodetický východ),
- X^n – os smerujúca k elipsoidickému severu (geodetický sever),
- Y^n - os smerujúca pozdĺž normály eplipsodu.

Špecifický referenčný rámec je taktiež známy pod názvom east - north - up (ENU) alebo pri inej orientácii osi sa používa označenie north – east – down (NED). Navigačný rámec je častokrát označovaný ako rámec na miestnej úrovni (**Local frame l-frame**).

1.2.5 Azimutálny rámec (*Wander azimuth frame, w-frame*)

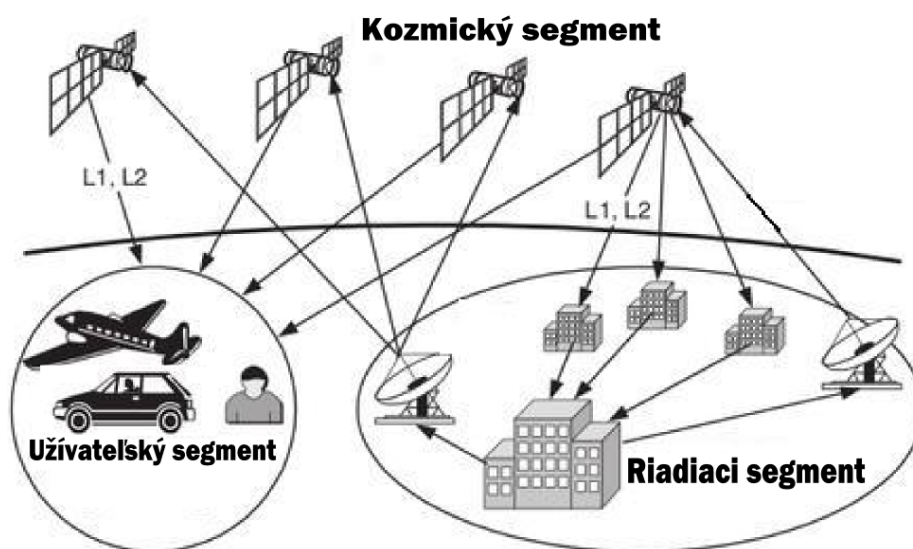
Takzvaný putovný azimutálny rámec je navigačným rámcem s ťažiskom v strede IMU, ale používa sa najmä pri výškových šírkach (okolo pólov) namiesto navigačného rámca uvedeného v podkapitole 1.2.4.

Vzhľadom k tomu os Y smeruje vždy ku geodetickému severu, pohybuje sa v smere východ-západ a v blízkosti pólov bude mať za následok rotáciu okolo osi Z, a uhol azimutu bude zvieraný geodetickým severom a Y-osou. (10)

2. GNSS

Globálne navigačné satelitné systémy umožňujú presnú absolútnu lokalizáciu na akomkoľvek mieste na svete pokryté satelitným signálom. Prostredníctvom vysokých nákladov sú zariadenia zabezpečovaná vládami rôznych štátov, pretože možnosť spoľahlivej lokalizácie a presnosti na metre dostupnej kdekoľvek na Zemi a v ktoromkoľvek okamihu má strategický význam.

Existujú všeobecne známe tri navigačné systémy: americký GPS (*Global Positioning System*) – globálny polohový systém, ruský GLONASS (*Globalnaja Navigacionaja Sputnikovaja Sistema*), čínsky *Compass* a európsky *Galileo* na rozdiel od ostatných navrhnutý ako civilný.



Zdroj: <http://www.ciotc.org/cyfh/yfzt/gczx/index.htm> (upravili autori)

Obr. 2: Riadiaci, užívateľský a kozmický segment

Systém GPS tvoria tri segmenty: kozmický, užívateľský a riadiaci. Kozmický segment predstavujú družice obiehajúce po pravidelných dráhach okolo Zeme, ktoré nepretržite vysielajú rádiový signál, jeho súčasťou je presný čas a informácie o vlastnej polohe družice.

Užívateľský segment tvoria vojenské alebo civilné prijímače, ktoré sú schopné tento signál prijať a vyhodnotiť. Riadiaci segment sa skladá z pozemných staníc a je určený k monitorovaniu družíc a komunikácií s nimi, k nastavovaniu informácií o ich presnej polohe, ku korekcii chodu družicových atómových hodín a taktiež k ovládaniu družíc. Pri prípadnom zničení staníc riadiaceho segmentu, vrátane staníc záložných, uvažovanom pre prípad vojenského konfliktu, je systém GPS schopný autonómneho fungovania po dobu až 180 dní (2).

Proces lokalizácie možno zjednodušene popísať nasledovne: na jednotnej nosnej frekvencii vysielajú jednotlivé družice rôzne diaľkomerné kódy tvorené slabým pseudonáhodným rádiovým signálom. Prijímač, ktorý tieto kódy pozná, je schopný signál prijať a vyhodnotiť. Pokiaľ by boli hodiny prijímača a družíc presne synchronizované, stačilo by prijímaču k určeniu polohy zmerať, ako dlho trvala cesta signálu z troch pozorovaných družíc – prienikom povrchu troch kruhov sú síce dva body, ale len jeden z nich leží blízko povrchu Zeme. Pretože prijímač používa bežne kremíkové hodiny, ktoré na rozdiel od presných družicových atómových hodín synchronizované nie sú, je pri lokalizácii vždy potrebné určovať okrem súradníc v priestore presný čas. K určeniu hodnoty týchto štyroch neznámych je preto nutné meranie zo štyroch rôznych družíc. Vzhľadom k rýchlosti šírenia elektromagnetického signálu, rýchlosti pohybu satelitov a rôznej veľkosti gravitácie na Zemi a na obežných dráhach je potrebné pri výpočtoch postupovať podľa teórie relativity.

Pre zvýšenie presnosti štandardnej GPS lokalizácie je možné využiť techniku *DGPS* (*Diferenciálne GPS*). Technika využíva referenčné stanice – prijímače GPS umiestené na známych súradniciach. Z rozdielu skutočnej a nameranej polohy vypočítavajú referenčné stanice korekciu, ktorú rôznymi cestami (prostredníctvom internetu, rádiových, mobilných dátových sietí atď.) poskytujú užívateľským prijímačom GPS v blízkom okolí, ktoré podľa nich môžu prevádzať opravu vlastnej nameranej polohy. Okrem zariadení vlastnej referenčnej stanice je možné využiť už existujúce siete referenčných staníc prevádzaných súkromnými firmami, štátnymi organizáciami alebo vedeckými inštitúciami (3).

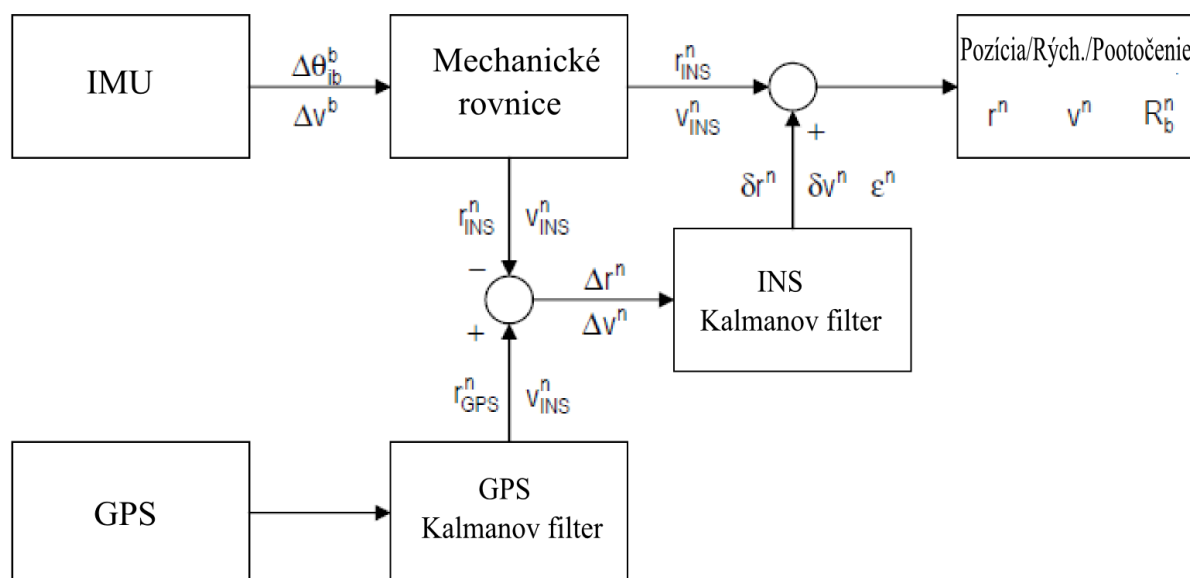
3. INTEGRÁCIA MEDZI INS A GPS

Integrácia medzi INS a GPS možno vykonať niekoľkými spôsobmi. Základné vlastnosti všetkých metód používaných pri integrácii INS a GPS dát je, že IMU poskytujú referenčnú trajektóriu, zatiaľ čo GPS slúži ako systém na aktualizáciu dát. To je hlavne kvôli tomu, že frekvencia meraní INS je niekoľkonásobne vyššia, ako je jedna z GPS (100 - 400Hz pre INS, 1 - 10Hz pre GPS) (6). Statické vektorové parametre bude teda potrebné určiť s vysokou frekvenciou a aktualizované (opravené) s nízkou frekvenciou. Hlavný rozdiel medzi nimi sa nachádza v toku dát (7).

3.1 Voľná integračná metóda

Voľná integračná metóda je založená na práci dvoch nezávislých filtrov, ktoré pracujú súčasne, pre meranie INS - INS Kalmanov filter, a pre meranie GPS - GPS Kalmanov filter. Postup pri voľnej integračnej metóde opisujú nasledovné kroky:

- Proces spracovania GPS merania prostredníctvom GPS Kalmanovho filtra na určenie polohy a rýchlosti z GPS (r_{GPS}^n, v_{GPS}^n).
- Proces spracovania INS merania prostredníctvom mechanického spracovania rovníc ($\Delta\theta_{ib}^b, \Delta v^b$) na určenie polohy a rýchlosti z INS (r_{INS}^n, v_{INS}^n).
- Použitie polohy a rýchlosti z bodu a) ako vstup do INS Kalmanovho filtra. Filter sa rozdelí medzi polohy a rýchlosti a) a b) t.j. ($\Delta r^n, \Delta v^n$) za účelom zistenia odhadovaných chýb v polohe a rýchlosti ($\delta r^n, \delta v^n$) a chyby vychýlenia (ϵ^n).
- Použitím odhadovanej chyby z kroku c) na aktualizáciu polohy a rýchlosti kroku b) cielene určíme uvedený vektor (r^n, v^n, R_b^n).



Zdroj: <http://www.imm.dtu.dk/> (upravili autori)

Obr. 2: Voľná integračná metóda

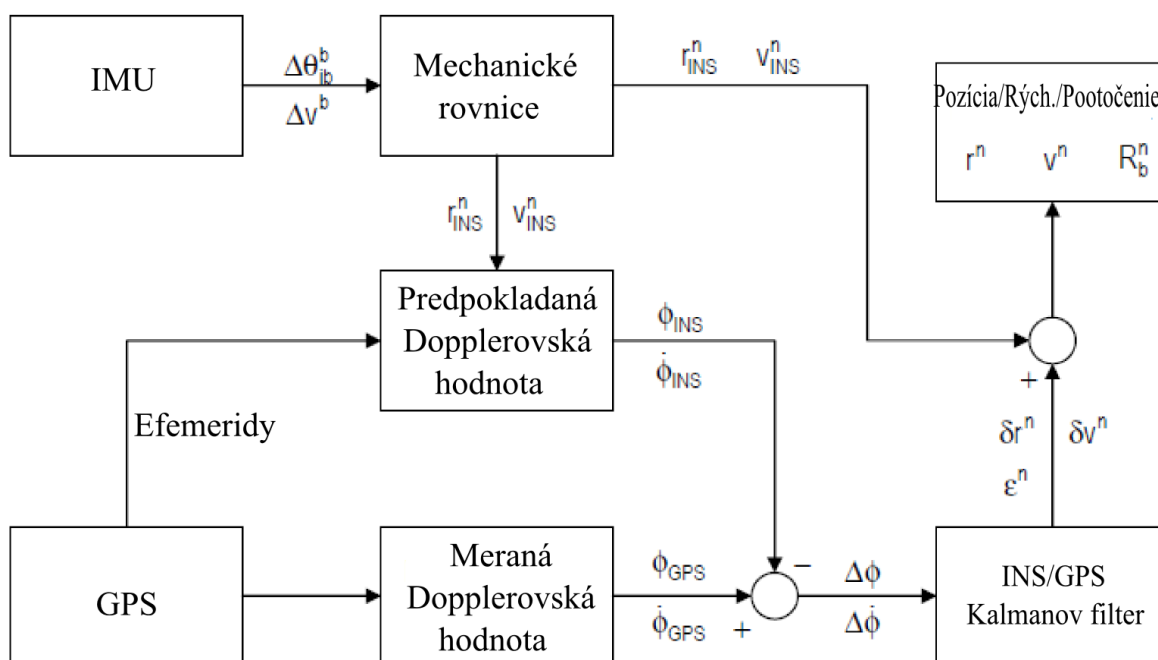
Výhodou metódy voľnej integrácie je predovšetkým jej jednoduchosť prevedenia a jej robustnosť, ak jeden zo senzorov zlyhá, nastupuje druhý senzor (8). Ďalšou výhodou voľnej integrácie môže byť čas spracovania algoritmu v dôsledku všeobecne menších uvedených vektorov (9). Voľná metóda je v literatúre často označovaná aj pod pojmom decentralizovaná integrácia, pretože využíva dva rôzne Kalmanove filtre (7).

Nevýhodou voľnej metódy je zlyhanie aktualizácie GPS dát z dôvodu nedostatočného pokrytia signálom (minimálne štyri družice) (6). To však nie je prípad nasledujúcej metódy 3.2.

3.2 Pevná integračná metóda

Pevná integračná metóda je tvorená jedným Kalmanovým filtrom nazývaným Kalmanov INS/GPS filter. Postup pri spracovaní dát popisujú nasledovné kroky (7):

- Proces spracovania INS merania prostredníctvom mechanického spracovania rovníc ($\Delta\theta_{ib}^b$, Δv^b) na určenie polohy a rýchlosti z INS (r_{INS}^n , v_{INS}^n).
- Použitím efemeríd GPS informácií na určenie polohy a rýchlosti z kroku a) predpokladáme pseudovzdialenosť a Dopplerovské merania (Φ_{INS} , $\dot{\Phi}_{INS}$).
- Použitie predpokladanej pseudovzdialenosti a Dopplerovských meraní z kroku b) ako vstup do INS/GPS Kalmanovho filtra. Filter sa rozdelí medzi pseudovzdialenosť a Dopplerovské merania z kroku b) t.j. (Φ_{GPS} , $\dot{\Phi}_{GPS}$) za účelom zistenia odhadovaných chýb v polohe a rýchlosti (δr^n , δv^n) a chyby vychýlenia (ϵ^n).
- Použitím odhadovanej chyby z kroku c) na aktualizáciu polohy a rýchlosti kroku a) cielene určíme uvedený vektor (r^n , v^n , R_b^n).



Zdroj: <http://www.imm.dtu.dk/> (upravili autori)

Obr. 3: Pevná integračná metóda

Hlavnou výhodou pevnej integračnej metódy je aktualizácia INS dát aj napriek nedostatočnému pokrytiu satelitmi (menej ako štyri družice), aktualizácia je možná na základe pseudovzdialenosti a Dopplerových meraní. Pevná integračná metóda je najčastejšie využívaná v mestských oblastiach, kde je nedostupné pokrytie GPS satelitov a časté vypadávanie signálu (8).

Nevýhodou metódy je predovšetkým zväčšenie statickej vektorovej veľkosti Kalmanovho filtra s oboma meraniami GPS aj INS a to vedie k dlhšej dobe spracovania. Pevná integračná metóda sa v niektorej literatúre označuje ako metóda centrálnej integrácie vzhľadom k jedinému hlavnému Kalmanovému filteru (6).

3.3 Ostatné integračné metódy

Medzi ostatné integračné metódy sa zaradzuje najčastejšie „uncoupled“ tzv. odpojená a "deep / ultra-tight" tzv. nekonečne pevná integrácia.

Prvý spôsob „uncoupled“ je jednoduchý, ak je k dispozícii používa GPS riešenie, a inak používa INS riešenie. Ak je k dispozícii GPS riešenie - obnoví polohu INS a rýchlosť na existujúce dáta z GPS. Systém neposkytuje žiadnu spätnú väzbu, chyby odhadu ani mechanické rovnice, takže chyba polohy a rýchlosti sa bude neustále zvyšovať počas obdobia bez GPS riešení.

Druhá metóda "deep / ultra-tight" kombinuje INS a GPS vo veľmi úzkom prepojení s aktualizáciou z GPS dát do riešenia INS. Prístup k firmvéru GPS prijímača používajú hlavne výrobcovia GPS (9).

ZÁVER

Terénne určovanie polohy INS prebieha predovšetkým v zalesnených oblastiach, v lokalitách obmedzeného príjmu signálu GPS, pri topografickom mapovaní seizmických zlomov, mapovaní prírodného prostredia, oblastí odvodňovania, pobrežných lokalít ohrozovaných záplavami, v zastavaných mestských sídlach, vo vnútri zastrešených objektov, pri podzemných prácach a v prípade potreby opakovaných meraní pre zisťovanie polohových zmien v závislosti na čase.

Významné využitie prostriedkov INS je v tuneloch a podzemných vedeniach energetických surovín - ropovodov, plynovodov, podzemných skladoch pri kontrolách tlaku, korózii a vôbec ich stavu, stálosti ich lokalizácie. Určovanie polohy INS v podzemí je dopĺňované laserovým profilovým meraním stavu chodieb a stalo sa osobitou súčasťou súčasnej inžinierskej geodézie. Významným prínosom je využívanie technológií INS pod hladinou mora k mapovaniu reliéfu morského dna s použitím techniky ROV (*Remote Operated Vehicle*), predovšetkým pri plánovaní a budovaní produktovodov, hlavne naftovodov. Dosahovaná presnosť je v 3D udávaná v decimetroch, maximálne však do 5m, polohové súradnice trasy vedenia sú vzťahnuté k používanému geodetickému referenčnému systému (4).

Prínosy a aplikačné možnosti INS v súčasnej geodézii a topografii, pri operatívnej kombinácii INS s DGPS, polohových riešeniach v 3D priestore. Perspektíva technológií INS v aplikáciách na spojoch a riadených prevozov letísk, v kombináciách s mobilnými kamerami laserového snímania MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) (5).

Článok je súčasťou riešenia grantového projektu VEGA 1/0922/12.

POUŽITÁ LITERATURA

- (1) SKOG, I. ; HÄNDEL, P. In-car positioning and navigation technologies – a survey. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 10, No. 1. Mar. 2009. s. 4–21.

- (2) RAPANT, P. *Družicové polohové systémy*. Vyd. 1. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002. 200 s. ISBN 80-248-0124-8.
- (3) CZEPOS [online]. Český úřad zeměměřický a katastrální, 2011 [cit. 2011-08-01]. Česká síť permanentních stanic pro určování polohy. URL: <<http://czeapos.cuzk.cz/>>.
- (4) FLACELIÉRE, B. - In. *Le positionnement inertial et ses applications terrestres, souterraines et sous-marines*: Rev. XYZ - Roč.32, č.125 (2010), s. 48-54 : 13 obr., 2 tab. - Lit. 10.
- (5) DUŠÁTKO, D. *Inerciální určování polohy a její terénní, podzemní a podmořské aplikace*. VÚGTK 42 690, Novinky Zeměměřické knihovny, 2011. 3-7s.
- (6) JEKELI, J. *Inertial Navigation System with Geodetic Application*. Berlin, New York – de Gruyter, 2001. ISBN 3-11-015903-1
- (7) GODHA, S. *Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated with GPS for Land Vehicle Navigation Application*, MSc Thesis, published as UCGE Report No. 20239, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada, 2006.
- (8) GODHA, S. – CANNON, M.E. *Development of a DGPS/MEMS IMU Integrated System for Navigation in Urban Canyon Conditions*. Proceedings of GNSS-05, Hong Kong, 8-10 December, 2005.
- (9) PETROVELLO, M.G. *Real-time Integration of a Tactical-Grade IMU and GPS for High-Accuracy Positioning and Navigation*, PhD Thesis, published as UCGE Report No. 20173, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada, 2003.
- (10) SCHULTZ, C.E. *INS and GPS integration*, Technical university of Denmark. IMM – M.Sc-2006-60, ISSN 1601-233X. [online] <<http://www.imm.dtu.dk/>>